

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 27 日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760134

研究課題名(和文)高精度な空力騒音の数値予測に向けた真の音源の同定

研究課題名(英文) Identification of true acoustic sources for high-accuracy prediction of aerodynamic  
noise

研究代表者

横山 博史 (Hiroshi, Yokoyama)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：60581428

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：二次元角柱周りの流れから発生する空力音を対象とし、Lighthillテンソルを音源とした分離計算を行った。その結果、角柱中心から下流に渦6つ程度に相当する領域までが遠方音場に寄与する主要な音源であることがわかった。このことは、渦が角柱から放出される際に成長・変形することが音波の発生に寄与していることを示唆しており、音場を予測する際は、この領域の音源を流体解析において精度良く捉える必要がある。さらに、以上のように角柱まわりの空力音源に関して得られた知見を、強いピーク性の音が問題となるキャビティまわりの流れや平板列まわりの流れへ応用した。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify dominant aerodynamic sound sources with regard to the sound generated from flows around a rectangular cylinder, decoupled simulations based on the Lighthill's acoustic analogy are performed. In these decoupled simulations, acoustic fields are predicted by the acoustic simulations using the Lighthill's tensor, which is computed by incompressible flow simulations. As a result, the acoustic sources in the region corresponding to 6 vortices mainly contribute to the far acoustic field. This indicates that the vortical deformation and development contribute to the acoustic radiation. For the prediction of the acoustic field, the acoustic sources in the above-mentioned region need to be captured. This knowledge is applied to the cavity flows and the flows around a cascade of flat plates.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：音響

1. 研究開始当初の背景

空力騒音は空気の流れから発生する騒音である。空力騒音は流れの速度が上昇すると、発生する音のパワーは速度の 6-8 乗に比例して増大し、近年の高速輸送機関や流体機器の高速化に伴い、空力騒音が大きな問題となっている。そのため、空力騒音の音源を明らかにし、低減する手法を確立することが望まれている。

2. 研究の目的

本研究は、二次元角柱周りの流れから発生する空力音の予測を、ライトヒル音源を基に行い、遠方の音場に寄与する主要な音源の同定を行うことで渦からの音の発生機構について明らかにする。さらに、これらの知見から、高精度に空力音の予測を行う際の指針を提案する。

3. 研究の方法

計算対象は図 1 に示すような速度  $U_0$  の一様流中に置かれた二次元角柱である。ここでは、流体は標準空気として計算を行った。流れ場の解析は、三次元非圧縮性ナビエ-ストークス方程式を基礎方程式とした有限要素解析ソフトを使用して行った。時間積分、空間積分ともに二次精度である。

本研究では、計算結果の格子依存性についていくつかの計算格子で検討をおこない、適切な計算格子において計算をおこなった。計算格子の  $x$ - $y$  断面を図 2 に示す。座標原点は角柱の中心とした。

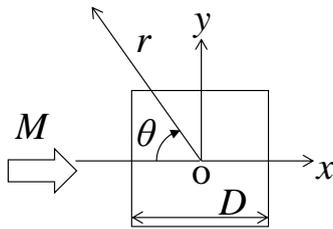


図 1 角柱まわりの流れ

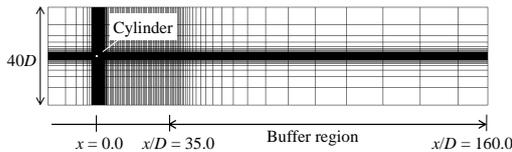


図 2 流体計算に用いた計算格子の  $x$ - $y$  断面 (5 グリッド毎を表示).

(2)音響計算手法

音響解析の支配方程式は、圧縮性ナビエ-ストークス方程式から厳密に導かれる式 (1) に示すライトヒル方程式である。

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 \rho}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}, \quad (1)$$

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + \delta_{ij} [(p-p_0) - c_0^2 (\rho-\rho_0)] - \sigma_{ij}. \quad (2)$$

ここで、 $T_{ij}$  はライヒルテンソルと呼ばれ、 $\sigma_{ij}$  は粘性応力項である。予備計算としておこなった直接計算の結果より、式 (2) の右辺項の第 2 項および第 3 項を算出し、音に対する寄与を調査した結果、これらの項の影響は無視できるほど小さいことを確認した。そのため音響解析は第 1 項のみを音源として行った。また、密度は常に主流の密度  $\rho_0$  で一定とした。解析には波動方程式を有限要素法により解くプログラムを使用した。本プログラムでは、前述した波動方程式を周波数空間において解く。ここで、周波数  $f$  で変動する物理量を次式のように表す。

$$g_f = \tilde{g}_f(\mathbf{x}) e^{i2\pi f t}. \quad (3)$$

式(3)を用い、式(1)を次式のように表す。ここで  $k$  は波数を表す。

$$\frac{\partial^2 \tilde{\rho}_f}{\partial x_i \partial x_j} + k^2 \tilde{\rho}_f = -\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \tilde{T}_{ij,f}}{\partial x_i \partial x_j}. \quad (4)$$

本研究では、角柱から渦が放出する周波数  $St \equiv fD/U_0 = 0.15$  における音が主要な音であるため、この周波数において音響計算をおこなった。

図 3 に計算格子の  $x$ - $y$  断面を示す。予備計算において、計算領域を流体解析と同様に矩形形状とし解析をおこなった際、遠方境界の角部において音波が反射しているような音場が得られたため、そうした反射を抑えるよう計算領域の遠方境界は円状とした。

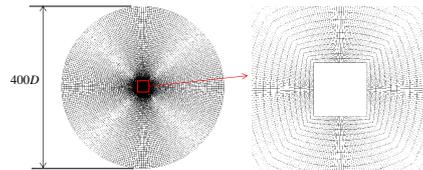


図 3 音響計算に用いた計算格子の  $x$ - $y$  断面 (5 グリッド毎に表示).

#### 4. 研究成果

図 4(a)には、流体解析結果から得られた音源の実部を、図 4(b)には  $y/D = 0.5$  における音源の振幅の流れ方向分布を示している。図 4(b)より、角柱前縁 ( $x/D = -0.5$ ) 近傍に強い音源が存在することがわかる。また、角柱より後流  $x/D = 2.0$  近傍においても音源項は強く、下流に向けてじょじょに弱まることがわかる。これは、粘性により渦が減衰することによると考えられる。ここでは、遠方の音場へ寄与する主要な音源をさらに詳しく明らかにするため、図 4 に示した音源の内、一部の音源をフィルターにより減衰させ音響計算を行い、得られた音場をフィルターなしの音源を用いて得られた音場と比較した。使用したフィルター関数は式 (5), (6) に示すハニング窓型のものを用いて、減衰開始位置  $x_s$  より下流の音源を減衰させた。

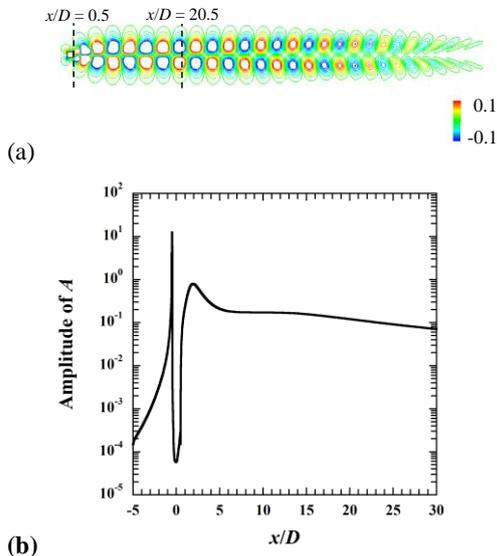


Fig. 4 (a) Contours of real part of  $A = \partial^2 \tilde{T}_{y,f} / \partial x_i \partial x_j$ .  
(b) Amplitude of  $A = \partial^2 \tilde{T}_{y,f} / \partial x_i \partial x_j$  along  $y/D = 0.5$ .

$$\hat{A} = A \times G(x_d), \quad (5)$$

$$G(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left( 1 + \cos \frac{x_d}{L} \pi \right) & (0 < x_d < L) \\ 1.0 & (x_d \leq 0) \\ 0 & (L \leq x_d) \end{cases}, \quad (6)$$

ここで、 $x_d$  は  $x_s$  を基準とした流れ方向位置を表し、ゲイン  $G$  が 1 から 0 になるまでの距離を減衰距離  $L$  とした。予備計算により、音源を急激に減衰させると、音響計算において非物理的な音場が予測されることがわかっており、ここではそのような音場が形成されない減衰距離  $L = 20D$  とした。減衰の開始位置

を  $x_s/D = -5.0, 0.5, 5.0$  と変化させ、音場に及ぼす影響を明らかにした。それぞれのフィルターにおいて、角柱後縁からゲインが 0 となる位置までに含まれる渦の個数は、4, 6, 8 個程度となっている。

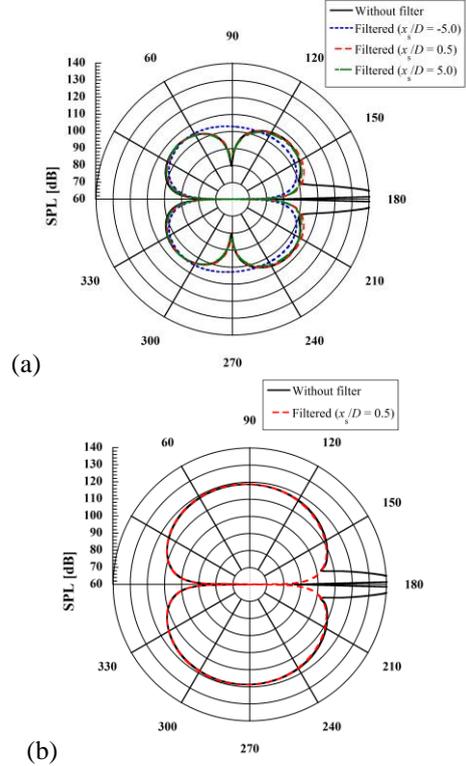


Fig. 5 Polar plots of sound pressure levels predicted along  $r/d = 30.0$  for  $M = 0.2$ . (a) Sound without scattering. (b) Sound with scattering.

フィルターによって減衰させた音源を用い、音響計算をおこなった。ここでは、渦からの音の発生機構を厳密に議論するため、まず角柱による散乱効果を除去した音響計算をおこなった。得られた音圧分布を、フィルターなしの場合と合わせて図 5 (a) に示す。なお、フィルターなしの計算結果の  $\theta = 165^\circ$  から  $195^\circ$  において見られる強い圧力変動は、渦の通過による流体力学的な圧力変動によるものであるため、ここでは議論の対象としない。

図 5 (a) より、 $x_s/D = 0.5, 5.0$  においてはフィルターをかけない場合と大きな違いはないが、 $x_s/D = -5.0$  の場合は  $\theta = 90^\circ$  付近で 19dB 程度の差が生じていることがわかる。減衰開始位置  $x_s/D = 0.5$  のフィルターにおいて、 $x/D \geq 20.5$  の領域では音源を 0 にしているが、フィルターによる音場への影響は小さかったことから、 $x/D \geq 20.5$  の領域の音源 (図 4 参照) は、遠方音場への寄与が小さいと考えられる。



Fig. 6 Contours of vorticity  $\omega/(U_0/D)$ .

上記の結果は、音響学的観点からは、 $x/D \geq 20.5$  の領域においては音源の放射効率が低くなっていることを意味している。これは、図 4 に示すように、前述の領域においては、流れ方向の音源振幅の変化が小さいながら(図 4(b)参照)、流れ方向に位相の正負が交互に変化しており(図 4(a)参照)、各点の音源から発生する音波が打ち消し合っているためと推測される。

また、渦と音波の関係を考えると、図 6 に示した渦度分布からわかるように、この領域における渦は単に対流もしくは滑らかに減衰しているのみであるため、強い音波が発生しないと考えられる。一方、 $x/D < 20.5$  の領域では、渦が角柱から放出される際に成長・変形することによって音波が発生すると考えられる。減衰開始位置  $x_s/D = -5.0$  のフィルターをかけた場合、元の音場と大きな差が生じたのは、こうした実際に音波が発生する領域の音源分布の一部をフィルターにより減衰させてしまったためと考えられる。また、分離計算により音場を予測する際は、この領域の音源を流体解析において精度良く捉える必要がある。

図 5 (b) には、減衰開始位置  $x_s/D = 0.5$  のフィルターをかけた音源 ( $x/D \geq 20.5$  では音源は 0 となる) を用い、角柱による散乱効果が入った条件において音響計算をおこなった結果を示しており、散乱なしの結果と同様に、フィルターなしの結果と大きな違いがないことが確認された。このことは、 $x/D \geq 20.5$  の領域の音源が遠方音場に寄与しないという上記の結論を支持する。

研究代表者らは、以上のように角柱まわりの空力音源に関して得られた知見を、強いピーク性の音が問題となるキャビティまわりの流れや平板列まわりの流れへ応用した。キャビティ流れや平板列まわりの流れでは、空力音が流れに影響を与える音響学的フィードバックが発生するために、流れと音の直接計算を実施し、音源について議論し、そうした流れからの音の発生機構や、音が低減される場合について明らかにしてきた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

① Hiroshi Yokoyama, Katsuya Kitamiya, and Akiyoshi Iida, Flows around a cascade of flat plates with acoustic resonance, Physics of Fluids, 査読有、Vol. 25, No. 10, 106104-1-22  
DOI: 10.1063/1.4825376

② 横山博史、北宮克哉、飯田明由、一様流中におかれた平板列からの音響共鳴を伴う空力音の発生、日本機械学会論文集、査読有、Vol. 79, No. 804, 1419-1433

DOI: 10.1299/kikaib.79.1419

③ 横山博史、飯田明由、低マッハ数の角柱周りの流れにおける空力音源、日本機械学会論文集、査読有、Vol. 79, No. 799, 344-355

DOI: 10.1299/kikaib.79.344

[学会発表] (計 4 件)

① Hiroshi Yokoyama, Hiroshi Odawara, Akiyoshi Iida, Direct Simulations of Effects of Free-stream Turbulence on Cavity Tone, Inter-Noise 2013, 2013 年 9 月、オーストリア、2013 年 9 月 18 日

② Hiroshi Yokoyama, Taishi Shinohara, Masashi Miyazawa and Akiyoshi Iida, Acoustic Radiation in Flows around a Trailing Edge with an Upstream Kink Shape, Inter-Noise 2013, オーストリア、2013 年 9 月 18 日

③ Hiroshi Yokoyama, Katsuya Kitamiya and Akiyoshi Iida, ACOUSTIC RADIATION WITH RESONANCE IN FLOWS AROUND A CASCADE OF FLAT PLATES, ICSV20, 2013 年 7 月 9 日、タイ

④ Hiroshi Yokoyama, Akiyoshi Iida, Acoustic Radiation in a Uniform Flow around a Two-dimensional Cylinder at Low Reynolds Number, ICSV19, 2012 年 7 月 11 日、リトアニア

[その他]

ホームページ等

<http://aero.me.tut.ac.jp/>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

横山 博史 (HIROSHI, Yokoyama)

豊橋技術科学大学・工学系研究科・助教

研究者番号：60581428